

三分量磁通门梯度仪校准算法研究*

杨志成^{1,2}, 严胜刚^{1,2}, 李斌^{1,2}

(1. 西北工业大学航海学院 西安 710072; 2. 海洋声学信息感知工业和信息化部重点实验室 西安 710072)

摘要:针对三轴磁通门传感器非正交、灵敏度不一致、零偏以及构成梯度仪的两个磁通门传感器位置不一致引起的测量误差问题,建立了误差模型;基于地磁矢量模值短时不变原理,采用线性化最小二乘算法进行一个磁通门传感器参数的辨识;基于校准后三分量差值 F 范数最小原理,采用多元线性回归的方法进行另一个磁通门传感器参数以及两个磁通门传感器相对位置关系参数的辨识。实验结果表明,该方法能够将两个磁通门中最大总场误差从 1 194.4 nT 降低到 30.0 nT,将三分量梯度仪最大输出误差从 529.1 nT 降低到 13.4 nT,有效地改善了梯度仪性能。

关键词: 三轴磁通门梯度仪;误差校准;线性化最小二乘;最小 F 范数;多元线性回归

中图分类号: TH762.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Study on the calibration method for tri-axis fluxgate gradiometer

Yang Zhicheng^{1,2}, Yan Shenggang^{1,2}, Li Bin^{1,2}

(1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Key Laboratory of Ocean Acoustics and Information Sensing, Ministry of Industry and Information Technology, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aiming at the measurement errors caused by non-orthogonality, inconsistent sensitivity, zero-offset of the tri-axis fluxgate sensor and the position misalignment of two fluxgate sensors composed of the gradiometer, the error model is established in this paper. Based on the invariance principle of total geomagnetic field vector modulus in a short time, the parameter identification of the first fluxgate sensor is performed with linear least squares algorithm; based on the principle of the minimum F norm of the 3 component difference after calibration, the parameter identification of the second fluxgate sensor and the relative position between two fluxgate sensors are conducted with the multiple linear regression method. The experiment results show that the proposed method can reduce the maximum total magnetic field error of two fluxgate magnetometers from 1 194.4 nT to 30.0 nT, and the maximum output error of the three component gradiometer from 529.1 nT to 13.4 nT. The performance of the gradiometer is effectively improved.

Keywords: tri-axis fluxgate gradiometer; error calibration; linear least square; minimum F norm; multiple linear regression

0 引言

三轴磁通门传感器以其体积小、价格低等优点被广泛应用于地磁测量、姿态导航等领域^[1-2]。磁通门梯度仪主要由两个性能接近的磁通门传感器组成,测量值为两个磁传感器的差值,和单个的磁通门传感器相比,梯度仪可以在一定程度上抑制背景磁场干扰^[3-4]。受生产工艺、安装水平及元器件精度的影响,三轴磁通门传感器存在由非正交、灵敏度不一致、零偏等因素引起的误差。此

外,梯度仪还存在由两个磁通门传感器摆放位置不一致引起的误差^[5-6],严重影响其性能。这种误差可以通过校准方法减小或消除。目前磁通门磁传感器校准方法主要分为两大类,一类需要恒定磁场标准装置产生标准磁场信息作为参考^[7],同时利用高精度三轴无磁转台产生标准方位信息,将标准磁场与传感器输出磁场对比求出误差参数,但操作复杂,对校准装置性能要求较高。另一类校准方法不需要提供标准磁场信息,主要利用地磁场短时不变原理对传感器进行校准^[8-9],其基本思路为理想磁传感器在稳定的磁场环境中自由旋转

时,其三轴磁场坐标轨迹为球,在受到自身因素和外部磁场干扰时,球将畸变为椭球,磁通门传感器的误差参数可以由椭球系数求出。求解椭球参数的方法包括代数法和几何法,代数法主要通过使校准后的磁场与当地地磁总场差值的平方和最小对椭球参数进行求解,对应的求解算法有:线性化最小二乘算法^[10]、最大似然估计法^[11-12]、非线性最小二乘算法^[13]、卡尔曼滤波算法^[14]、神经网络算法等^[15]。几何法主要通过使测量点到理想椭球切平面距离之和最小对椭球参数进行求解^[16-18]。和代数法相比,几何法具有明确的几何意义,但因其表达式复杂,不易求解。梯度仪中的单个磁通门误差可选用代数法或几何法中的一种算法进行校准。梯度仪中由两个磁传感器摆放位置不一致引起的误差通常通过坐标变换进行修正。

磁通门梯度仪的校准步骤:1)建立第1个传感器理想坐标系,将测量磁场数据校准到该理想坐标系中;2)对第2个传感器进行相同的操作;3)将两个理想坐标系中的数据通过坐标变换转换到同一个坐标系;4)将校准后三分量差值作为梯度仪的输出^[14]。本文提出了一种新的校准方法,将4步缩短为3步:假设只存在一个理想坐标系,两个磁传感器的非正交误差建立一个理想坐标系中。1)利用线性化最小二乘对其中的一个传感器进行校准;2)利用多元线性回归方法使梯度仪校准后输出的 F 范数最小,同时实现第2个传感器误差参数及两个传感器位置误差参数的辨识;3)将校准后三分量差值作为梯度仪的输出。仿真和实验表明,该方法操作简单,校准效果良好,能有效减小梯度仪误差。

1 梯度仪误差模型

假设构成梯度仪的两个磁通门传感器分别为1号传感器和2号传感器,1号传感器的三轴零点误差分别为 e_{11} 、 e_{12} 、 e_{13} ,灵敏度误差为 k_{11} 、 k_{12} 、 k_{13} (真实灵敏度与标称灵敏度比值);2号磁传感器的零点误差为 e_{21} 、 e_{22} 、 e_{23} ,灵敏度误差为 k_{21} 、 k_{22} 、 k_{23} 。假设1号磁传感器3个磁场测量方向构成的坐标系为 $O-x_1y_1z_1$,2号磁传感器测量方向构成的坐标系为 $O-x_2y_2z_2$,存在一个参考正交坐标系 $O-uvw$,使得 $O-uvw$ 与 $O-x_1y_1z_1$ 坐标系原点重合,且正交坐标系的 w 轴与传感器坐标系 z_1 轴重合,指向相同,传感器的 x_1 轴位于 uOz 面内。且 u 轴与 x_1 轴的夹角为 β_{11} ;1号传感器 y_1 轴与 uOv 面的夹角为 β_{12} ,其投影与 u 轴夹角为 α_{11} ;2号传感器 x_2 轴与 uOv 面的夹角为 β_{21} ,其投影与 u 轴夹角为 α_{21} ;2号传感器 y_2 轴与 uOv 面的夹角为 β_{22} ,其投影与 u 轴夹角为 α_{22} ;2号传感器 z_2 轴与 uOv 面的夹角为 β_{23} ,其投影与 u 轴夹角为 α_{23} 。两坐标系的关系如图1所示。

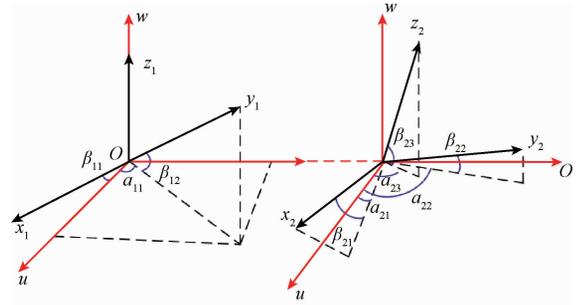


图1 测量坐标系与参考正交坐标系示意图
Fig. 1 Schematic diagram of measurement coordinate system and reference orthogonal coordinate system

根据几何关系,传感器坐标系与参考正交坐标系存在如下转换关系:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta_{11} & \cos\beta_{12}\cos\alpha_{12} & 0 \\ 0 & \cos\beta_{12}\sin\alpha_{12} & 0 \\ \sin\beta_{11} & \sin\beta_{12} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta_{21}\cos\alpha_{21} & \cos\beta_{22}\cos\alpha_{22} & \cos\beta_{23}\cos\alpha_{23} \\ \cos\beta_{21}\sin\alpha_{21} & \cos\beta_{22}\sin\alpha_{22} & \cos\beta_{23}\sin\alpha_{23} \\ \sin\beta_{21} & \sin\beta_{22} & \sin\beta_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

设1号磁传感器在坐标系 $O-x_1y_1z_1$ 下的测量值为 B_{m1x} 、 B_{m1y} 、 B_{m1z} ,2号磁传感器在坐标系 $O-x_2y_2z_2$ 下的测量值为 B_{m2x} 、 B_{m2y} 、 B_{m2z} ,真实磁场在坐标系 $O-uvw$ 下的三分量为 B_1 、 B_2 、 B_3 ,则存在式(3)、(4)。

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}_1(\mathbf{X}_1 - \mathbf{E}_1) \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}_2(\mathbf{X}_2 - \mathbf{E}_2) \quad (4)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \cos\beta_{11} & \cos\beta_{12}\cos\alpha_{12} & 0 \\ 0 & \cos\beta_{12}\sin\alpha_{12} & 0 \\ \sin\beta_{11} & \sin\beta_{12} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 \\ 0 & k_{12} & 0 \\ 0 & 0 & k_{13} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \mathbf{X}_1 = [B_{m1x} \ B_{m1y} \ B_{m1z}]^T,$$

$$\mathbf{E}_1 = [e_{11} \ e_{12} \ e_{13}]^T,$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \cos\beta_{21}\cos\alpha_{21} & \cos\beta_{22}\cos\alpha_{22} & \cos\beta_{23}\cos\alpha_{23} \\ \cos\beta_{21}\sin\alpha_{21} & \cos\beta_{22}\sin\alpha_{22} & \cos\beta_{23}\sin\alpha_{23} \\ \sin\beta_{21} & \sin\beta_{22} & \sin\beta_{23} \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} k_{21} & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & 0 \\ 0 & 0 & k_{23} \end{bmatrix}, \mathbf{X}_2 = [B_{m2x} \ B_{m2y} \ B_{m2z}]^T,$$

$$\mathbf{E}_2 = [e_{21} \ e_{22} \ e_{23}]^T, \mathbf{B} = [B_1 \ B_2 \ B_3]^T.$$

2 模型参数求解

2.1 1号传感器误差参数求解

为使得校准后磁场测量模值与地磁场模值误差平方最小,式(3)中的参数 $\mathbf{A}_1, \mathbf{E}_1$ 应满足式(5)。

$$\begin{bmatrix} K_{m1} \\ K_{m2} \\ K_{m3} \\ K_{m4} \\ K_{m5} \\ K_{m6} \\ K_{m7} \\ K_{m8} \\ K_{m9} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^2 + a_{31}^2 \\ a_{12}^2 + a_{22}^2 + a_{32}^2 \\ a_{33}^2 \\ 2(a_{11}a_{12} + a_{31}a_{32}) \\ 2a_{32}a_{33} \\ 2a_{31}a_{33} \\ -2(a_{11}^2e_{11} + a_{31}^2e_{11} + a_{11}a_{12}e_{12} + a_{31}a_{32}e_{12} + a_{31}a_{33}e_{13}) \\ -2(a_{12}^2e_{12} + a_{22}^2e_{12} + a_{32}^2e_{12} + a_{32}a_{33}e_{13} + a_{11}a_{12}e_{11} + a_{31}a_{32}e_{11}) \\ -2(a_{31}a_{33}e_{11} + a_{32}a_{33}e_{12} + a_{33}^2e_{13}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{B}\mathbf{M} = [(\mathbf{B}\mathbf{M}^1)^T \ (\mathbf{B}\mathbf{M}^2)^T \ \dots \ (\mathbf{B}\mathbf{M}^{N-1})^T \ (\mathbf{B}\mathbf{M}^N)^T]^T$, $\mathbf{B}\mathbf{M}^i = [(B_{m1x}^i)^2 \ (B_{m1y}^i)^2 \ (B_{m1z}^i)^2 \ B_{m1x}^i B_{m1y}^i \ B_{m1x}^i B_{m1z}^i \ B_{m1y}^i B_{m1z}^i \ B_{m1x}^i \ B_{m1y}^i \ B_{m1z}^i]$, $i = 1, \dots, N$, $B_{m1x}^i, B_{m1y}^i, B_{m1z}^i$ 为 1 号传感器第 i 次测量的磁场数据, $\mathbf{B}_i = [|\mathbf{B}|^2 \ \dots \ |\mathbf{B}|^2]^T_{1 \times 9}$, $|\mathbf{B}|^2$ 为地磁总场的平方。

由式(6)可以求出 \mathbf{K}_m , 代入到式(7)可以得到式(8)、(9)。

$$\begin{cases} a_{33} = \sqrt{K_{m3}} \\ a_{32} = K_{m5}/2a_{33} \\ a_{31} = K_{m6}/2a_{33} \\ a_{11} = \sqrt{K_{m1} - a_{31}^2} \\ a_{31} = \frac{0.5K_{m4} - a_{31}a_{32}}{a_{11}} \\ a_{22} = \sqrt{K_{m2} - a_{12}^2 - a_{32}^2} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} e_{11} \\ e_{12} \\ e_{13} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 2K_{m1} & K_{m4} & K_{m6} \\ K_{m4} & 2K_{m2} & K_{m5} \\ K_{m6} & K_{m5} & 2K_{m3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{m7} \\ K_{m7} \\ K_{m9} \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据式(8)和(9),可以求出系数矩阵 \mathbf{A}_1 和 \mathbf{E}_1 。

2.2 2号磁传感器误差及两传感器位置误差参数求解

由式(3)、(4)可知,理想条件下,梯度仪在稳定磁场中的输出为零,即存在式(10)。

$$\mathbf{X}^d = \mathbf{A}_1(\mathbf{X}_1 - \mathbf{E}_1) - \mathbf{A}_2(\mathbf{X}_2 - \mathbf{E}_2) = 0 \quad (10)$$

式中: \mathbf{X}^d 为梯度仪校准后的输出。当存在 N 组测量数据时,式(10)可改写为式(11)。

$$\mathbf{X}^{dN} = \mathbf{A}_1(\mathbf{X}_{1N} - \mathbf{E}_{1N}) - \mathbf{A}_2(\mathbf{X}_{2N} - \mathbf{E}_{2N}) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{X}^{dN} = [\mathbf{X}_1^d \ \dots \ \mathbf{X}_i^d \ \dots \ \mathbf{X}_N^d]_{3 \times N}$, $i = 1, \dots, N$, \mathbf{X}_i^d 为 \mathbf{X}^d 的梯度仪第 i 次校准后的输出。 $\mathbf{X}_{mN} = [\mathbf{X}_{m1} \ \dots \ \mathbf{X}_{mi}$

$$(\mathbf{A}_1, \mathbf{E}_1) = \operatorname{argmin}_{\mathbf{E}_1} \sum_{i=1}^{i=N} (\|\mathbf{A}_1(\mathbf{X}_i - \mathbf{E}_1)\|_2^2 - |\mathbf{B}|^2)^2 \quad (5)$$

式(5)是关于误差参数的二次函数。本文利用线性化最小二乘法^[10]将式(5)参数的求解转换为式(6)中 \mathbf{K}_m 的求解:

$$\mathbf{B}\mathbf{M} \times \mathbf{K}_m = \mathbf{B}_i \quad (6)$$

其中 \mathbf{K}_m 可以由式(7)表示。

$\dots \mathbf{X}_{mN}]_{3 \times N}$, $m = 1, 2$, \mathbf{X}_{mi} 为第 m 个传感器的第 i 次测量值。 $\mathbf{E}_{1N} = [E_1 \ \dots \ E_1 \ \dots \ E_1]_{3 \times N}$, $\mathbf{E}_{2N} = [E_2 \ \dots \ E_2 \ \dots \ E_2]_{3 \times N}$, E_1, E_1 为 1 号、2 号传感器的零点误差。

非理想状态下,应使 N 次测量值 \mathbf{X}^{dN} 的 Frobenius (F) 范数尽可能小,定义目标函数 f_3 如式(12)所示。

$$f_3 = \|\mathbf{X}^{dN}\|_F^2 \quad (12)$$

为方便计算,将式(12)变为式(13)所示。

$$f_3 = \|\bar{\mathbf{X}} - (\mathbf{A}_2\mathbf{X}_{2N} - \mathbf{B}_2)\|_F^2 = \operatorname{Tr}[(\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{A}_2\mathbf{X}_{2N} + \mathbf{B}_2)^T \cdot (\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{A}_2\mathbf{X}_{2N} + \mathbf{B}_2)] \quad (13)$$

其中, $\bar{\mathbf{X}}, \mathbf{B}_2$ 如下所示:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{A}_1(\mathbf{X}_{1N} - \mathbf{E}_{1N}) \\ \mathbf{B}_2 = \mathbf{A}_2\mathbf{E}_{2N} \end{cases} \quad (14)$$

为求出 f_3 最小值,分别对 f_3 中的 $\mathbf{B}_2, \mathbf{A}_2$ 求偏导数,并令偏导数等于 0,得到式(15)。

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{X}} - \mathbf{A}_2\mathbf{X}_{2N} + \mathbf{B}_2 = 0 \\ \bar{\mathbf{X}}\mathbf{X}_{2N}^T - \mathbf{A}_2\mathbf{X}_{2N}\mathbf{X}_{2N}^T + \mathbf{B}_2\mathbf{X}_{2N}^T = 0 \end{cases} \quad (15)$$

当 \mathbf{X}_2 行满秩时,式(15)中两等式等价,可以将其转换为式(16)所示的多元线性规划问题进行求解:

$$\begin{cases} x_1 - [a'_{11} \ a'_{12} \ a'_{13}] \mathbf{X}_{2N} + b_1 = 0 \\ x_2 - [a'_{21} \ a'_{22} \ a'_{23}] \mathbf{X}_{2N} + b_2 = 0 \\ x_3 - [a'_{31} \ a'_{32} \ a'_{33}] \mathbf{X}_{2N} + b_3 = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\bar{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$ 。通过式(14)、(16)可以求出

$\mathbf{A}_2, \mathbf{E}_2$ 。

3 模拟仿真

根据国际地磁参考场(international geomagnetic reference field, IGRF)地磁场模型,西安地区的总磁场为52 532.7 nT,磁倾角为52°54',磁偏角为-3°36'。以地理东为 x 轴正方向,地理北为 y 轴正方向,垂直向下为 z 轴正方向,则西安地区的地磁三分量为(31 653.3 nT, -1 968.8 nT, 41 810.1 nT)。椭球校准需要获取梯度传感器在空间中足够的输出,本文选用绕空间中固定轴旋转的方式获取磁场输出,绕3个不同的轴旋转3次,每次旋转一周,即可得到所需数据。三轴正交坐标系在空间中旋转时,可以将其分解为绕 x 轴旋转、绕 y 轴旋转、绕 z 轴旋转,设绕 x 轴旋转的旋转角为 θ ,绕 y 轴旋转的旋转角为 φ ,绕 z 轴旋转的旋转角为 ψ ,则旋转过程中的真实

磁场输出由式(17)决定。

$$\begin{cases} B_x = \cos\varphi\cos\psi B_{x0} + (\sin\theta\sin\varphi\cos\psi + \cos\theta\sin\psi) \cdot \\ B_{y0} + (-\cos\theta\sin\varphi\cos\psi + \sin\theta\sin\psi) B_{z0} \\ B_y = -\cos\varphi\sin\psi B_{x0} - (\sin\theta\sin\varphi\sin\psi - \cos\theta\cos\psi) \cdot \\ B_{y0} + (\cos\theta\sin\varphi\sin\psi + \sin\theta\cos\psi) B_{z0} \\ B_z = \sin\varphi B_{x0} + (-\sin\theta\cos\varphi) B_{y0} + (\cos\theta\cos\varphi) B_{z0} \end{cases} \quad (17)$$

结合式(3)和(4)可知,梯度仪中两个磁传感器的输出如式(18)所示。

$$\begin{cases} X_1 = A_1^{-1}B + E_1 + \xi_1 \\ X_2 = A_2^{-1}B + E_2 + \xi_2 \end{cases} \quad (18)$$

式中: A_1 、 A_2 、 E_1 、 E_2 为设定参数, B 由式(18)生成, ξ_1 、 ξ_2 为均值为0、方差为3 nT的高斯白噪声。旋转时,每周选取10个观测点,预设的参数与估计的参数如表1、2所示。

表1 1号传感器模拟参数与校准结果对比

Table 1 Comparison of actual value and calibration value for sensor No. 1

误差	实际参数值	估计参数值
非正交误差	$\begin{bmatrix} 0.9994 & 0.0140 & 0 \\ 0 & 0.9998 & 0 \\ 0.0349 & -0.0175 & 1.027 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9994 & 0.0140 & 0 \\ 0 & 0.9997 & 0 \\ 0.0349 & -0.0175 & 1 \end{bmatrix}$
灵敏度误差	$\begin{bmatrix} 0.9870 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0460 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0120 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9870 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0460 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0120 \end{bmatrix}$
零偏误差/nT	$[-30 \quad 60 \quad 110]^T$	$[-29.55 \quad 60.46 \quad 110.56]^T$

表2 2号传感器模拟参数与校准结果对比

Table 2 Comparison of actual value and calibration value for sensor No. 2

误差	实际参数值	估计参数值
非正交误差	$\begin{bmatrix} 0.9988 & 0.0331 & -0.0209 \\ -0.0349 & 0.9985 & -0.0007 \\ 0.0349 & -0.0436 & 0.9998 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9988 & 0.0331 & -0.0209 \\ -0.0349 & 0.9985 & -0.0007 \\ 0.0349 & -0.0436 & 0.9998 \end{bmatrix}$
灵敏度误差	$\begin{bmatrix} 0.9910 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9890 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0120 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9910 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9890 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0120 \end{bmatrix}$
零偏误差/nT	$[600 \quad -70 \quad 20]^T$	$[600.49 \quad -69.67 \quad 20.51]^T$

如表1所示,非正交参数估计的精度为0.27%,在保留4位小数的情况下灵敏度参数估计无误差,零点参数估计的精度为2.55%,说明该算法是有效的。

图2、3分别为1号、2号磁通门传感器校准前后磁场

模值对比,图4所示为校准前后三分量梯度仪输出对比,最大差值如表3所示。

由表3分析可知,校准后的误差主要由信号中的白噪声引起。

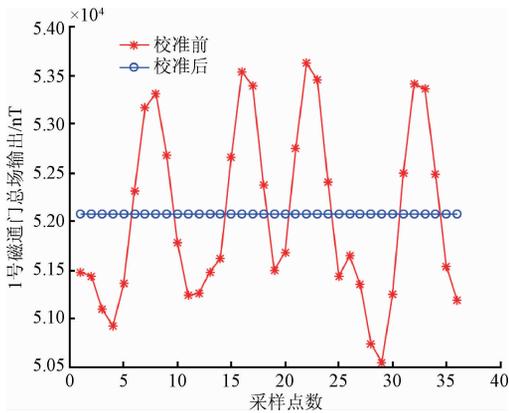


图 2 1 号磁通门校准前后磁场模值对比

Fig. 2 Comparison of the total magnetic intensity modulus before and after calibration for fluxgate No. 1

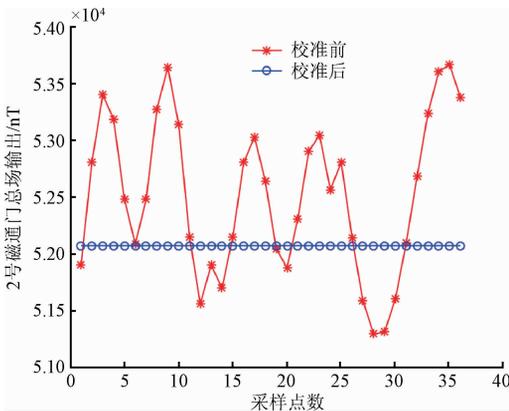


图 3 2 号磁通门校准前后磁场模值对比

Fig. 3 Comparison of total magnetic intensity modulus before and after calibration for fluxgate No. 2

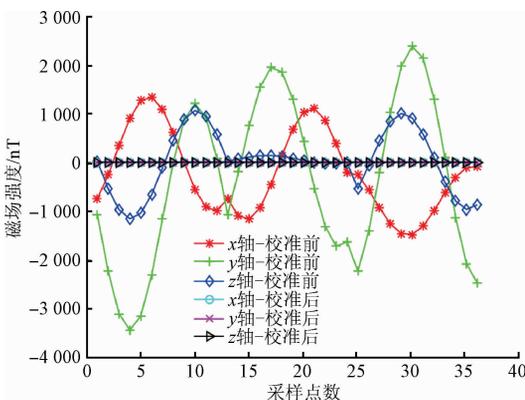


图 4 梯度仪三轴磁场差值校准前后对比

Fig. 4 Comparison of three-component magnetic field intensity difference of the gradiometer before and after calibration

表 3 梯度仪校准前后磁场误差对比 (峰峰值)

Table 3 Comparison of magnetic field error of the gradiometer before and after calibration (peak to peak value) (nT)

误差	校准前	校准后
1 号传感器总场误差	3 138.6	4.6
2 号传感器总场误差	2 633.0	4.1
x 轴方向误差	2 831.5	5.4
y 轴方向误差	5 801.9	5.6
z 轴方向误差	2 218.8	5.9

4 实验验证

实验地点选在西安某郊区,经测试可知该区域磁场环境稳定、噪声较小。梯度仪选用了西安华舜测量设备有限公司生产的三轴数字式梯度仪,该梯度仪主要由 2 个三分量磁通门传感器和 1 个 32 位数据采集模块组成,如图 5 所示,其性能指标如表 4 所示。



图 5 磁通门梯度仪及无磁转台

Fig. 5 The fluxgate gradiometer and nonmagnetic turntable

表 4 梯度仪性能指标

Table 4 Performance specification of the gradiometer

指标	参数
两传感器基线距离	500 mm
噪声	100 pT/Hz ^{1/2} @ 1 Hz
分辨力	优于 1 nT
A/D 转换位数	32 位
单传感器灵敏度	25 μV/nT

测试时将磁通门传感器固定于转台上,调节转台旋转角度,使传感器在空间中的位置不断发生改变,并通过上位机 LabVIEW 软件采集梯度仪的输出。改变磁通门的旋转轴,重复旋转两次。得到 3 组实验数据。

如图6、7所示,经过校准,梯度仪中两个传感器总场误差得到了大幅度下降。从图8可以看出,梯度仪的输出误差有了明显下降。误差的最大值如表5所示,由此可知该算法的有效性,但未达到模拟校准效果,主要原因可能在于实际测量地点存在一定的磁场梯度、磁通门探头在旋转过程中产生感应场等。

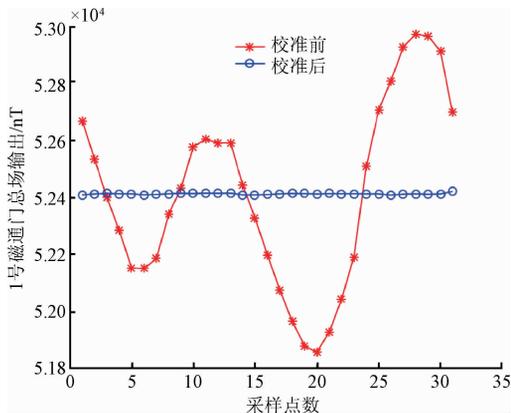


图6 1号磁通门校准前后总场输出对比

Fig. 6 Comparison of total magnetic field intensity before and after calibration for fluxgate No. 1

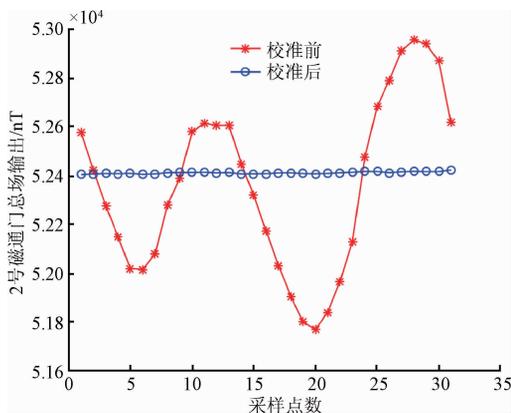


图7 2号磁通门校准前后总场输出对比

Fig. 7 Comparison of total magnetic field intensity before and after calibration for fluxgate No. 2

表5 梯度仪校准前后磁场误差对比(峰峰值)

Table 5 Comparison of the magnetic field error of the gradiometer before and after calibration

(peak to peak value) (nT)

误差	校准前	校准后
1号传感器总场误差	1 125.2	20.9
2号传感器总场误差	1 194.4	30.0
x轴方向误差	190.6	13.8
y轴方向误差	264.4	10.6
z轴方向误差	592.1	13.4

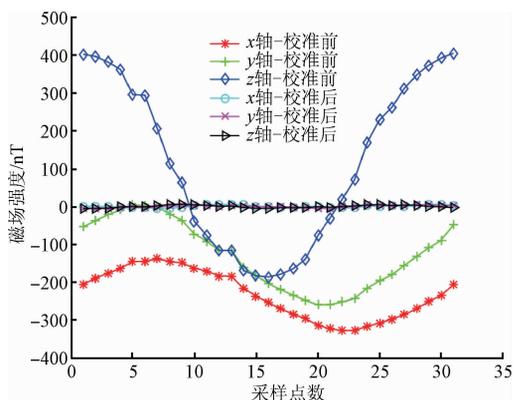


图8 梯度仪三轴磁场差值校准前后对比

Fig. 8 Comparison of three-component magnetic field intensity difference of the gradiometer before and after calibration

6 结论

根据建立的梯度仪误差校准模型,利用线性化最小二乘法完成一个磁通门传感器校准参数辨识,利用多元线性回归方法同时完成第2个磁通门传感器误差参数及两个磁通门传感器位置误差参数的辨识。仿真结果与实验结果证明了该算法的有效性,此外该方法操作简单,不需要恒定磁场装置,具有较高的准确性和实用性,具有良好的工程应用价值。

参考文献

- [1] 闫辉,肖昌汉. 一种海洋环境地磁场三分量的测量方法[J]. 海军工程大学学报,2005,17(6):80-83.
YAN H, XIAO CH H. A method of measuring three-component geomagnetic field on ocean [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2005, 17(6):80-83.
- [2] 张敬东. 未爆炸弹的磁梯度探测方法[J]. 探测与控制学报,2016,38(3):98-103.
ZHANG J D. Magnetic gradient detection of unexploded ordnance [J] Journal of Detection & Control, 2016, 38(3):98-103.
- [3] RIPKA P. Advances in fluxgate sensors [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2003, 106(1):8-14.
- [4] ROBBES D. Highly sensitive magnetometers-A review[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2006, 129(1-2):86-93.
- [5] REN Y, WANG Y, WANG M, et al. A measuring system for well logging attitude and a method of sensor calibration. [J]. Sensors, 2014, 14(5):9256-9270.
- [6] 林雪原,李勇,孙校书,等. 三维捷联磁传感器误差分析及补偿[J]. 海军航空工程学院学报,2005,20(5):510-512.
LIN X Y, LI Y, SUN J SH, et al Study on error analysis and compensation of three-axis strapdown magnetometers [J].

- Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2005, 20(5):510-512.
- [7] REN Y, WANG Y, WANG M, et al. A measuring system for well logging attitude and a method of sensor calibration[J]. Sensors, 2014, 14(5):9256-9270.
- [8] 张韦,刘诗斌,冯文光,等. 基于磁通门的三轴电子罗盘自动误差补偿方法[J]. 传感技术学报, 2012, 25(12):1692-1695.
- ZHANG W, LIU SH B, FENG W G, et al. Automatic error compensation method of three-axis electronic compass based on the fluxgate[J]. Chinese Journal of Sensors & Actuators, 2012, 25(12):1692-1695.
- [9] 高翔,严胜刚,李斌. 三轴磁通门磁梯度仪转向差校准方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6):1226-1232.
- GAO X, YAN SH G, LI B. Study on the steering differential calibration method for magnetic gradiometer base on tri-axis fluxgate[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6):1226-1232.
- [10] 张琦,潘孟春,陈棣湘,等. 基于线性化参数模型的三轴磁场传感器校准方法[J]. 传感技术学报, 2012, 25(2):215-219.
- ZHANG Q, PAN M CH, CHEN D X, et al. Scalar calibration of tri-axial magnetometer with linearized parameter model[J]. Chinese Journal of Sensors & Actuators, 2012, 25(2):215-219.
- [11] KOK M, SCHÖN T B. Maximum likelihood calibration of a magnetometer using inertial sensors[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3):92-97.
- [12] GEBRE-EGZIABHER D, ELKAIM G H, POWELL J D, et al. A non-linear, two-step estimation algorithm for calibrating solid-state strapdown magnetometers[C]. International St Petersburg Conference on Navigation Systems, 2001:28-30.
- [13] 龙礼,张合,丁立波. 三维磁传感器最大似然估计椭球拟合补偿算法[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(5):716-719.
- LONG L, ZHANG H, DING L B. Ellipsoid fitting compensation algorithm of 3-axis magnetometer based on maximum likelihood estimator[J]. Journal of Nanjing University of Science & Technology, 2013, 37(5):716-719.
- [14] 高翔,严胜刚,李斌. 基于最小二乘的磁通门梯度仪转向差校准方法[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(5):837-842.
- GAO X, YAN SH G, LI B. Error calibration method for magnetic gradiometer base on least square[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(5):837-842.
- [15] 庞鸿锋. 三轴磁通门传感器误差分析与校准[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010, 50-60.
- PAN H F. Analysis and calibration of three-axis fluxgate magnetometers error[D]. Changsha: University of Defence Technology, 2010, 50-60.
- [16] 李勇,刘文怡,李杰,等. 基于椭球拟合的三轴磁传感器误差补偿方法[J]. 传感技术学报, 2012, 25(7):917-920.
- LI Y, LIU W Y, LI J, et al. Error compensation method for three-axis magnetic sensor based on ellipsoid fitting[J]. Chinese Journal of Sensors & Actuators, 2012, 25(7):917-920.
- [17] 黄学功,王昀. 地磁信号检测系统误差分析与补偿方法研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(1):33-36.
- HUANG X G, WANG J. Error analysis and compensation methods for geomagnetic signal detection system[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(1):33-36.
- [18] 石岗,李希胜,李雪峰,等. 航向测量系统中三轴磁传感器标定的等效两步法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2):402-407.
- SHI G, LI X L, LI X F, et al. Equivalent two-step algorithm for the calibration of three-axis magnetic sensor in heading measurement system. [J] Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2):402-407.

作者简介



杨志成, 2013年于郑州大学获得学士学位, 2016年于中船重工第七一〇研究所获得硕士学位, 现为西北工业大学博士生, 主要研究方向为磁探测、磁补偿和数字信号处理。

E-mail: yangzhicheng@mail.nwpu.edu.cn

Yang Zhicheng received his B. Sc. degree from Zhengzhou University in 2013 and M. Sc. degree from No. 701 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation in 2016. Now he is a Ph. D. candidate in Northwestern Polytechnical University. His main research interest includes magnetic target detection, magnetic compensation and digital signal processing.



严胜刚, 1988年于中南大学获得学士学位, 分别在1991年和2008年于西北工业大学获得硕士学位和博士学位, 现为西北工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为现代信号处理及其应用、多传感器阵列信号处理、高速信号处理及其应用等。

E-mail: yshgang@nwpu.edu.cn

Yan Shenggang received his B. Sc. degree from Central South University in 1988, received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Northwestern Polytechnical University degree in 1991 and 2008, respectively. Now he is a professor and doctoral supervisor in Northwestern Polytechnical University. His main research interest includes modern signal processing and its application, multisensor array signal processing, and high-speed signal processing and its application.